

A STUDY OF SEDIMENT DELIVERY RATIO USING AVSWAT-X IN THE CATCHMENT AREA OF PACAL RESERVOIR OF BOJONEGORO

by Zulis Erwanto^a, Nadjadji Anwar^b, dan Bambang Sarwono^b

ABSTRACT

Recently, the flood intensity that brought by tributary rivers in the catchment area of Pacal reservoir has increased, both in the quantity of runoff and sediment volume. The research aims to set up erosion rate modeling and find the formulation of the Sediment Delivery Ratio (SDR) at Pacal reservoir. The research used USLE and MUSLE methods as comparator to find sediment yield accuracy at Pacal reservoir, by applying ArcView SWAT-X software. Total average annual erosion rate in the catchment area of Pacal reservoir which has area 82 Km² calculated using USLE and MUSLE methods are 159,31 ton/ha/yr and 582 ton/ha/yr respectively. MUSLE method resulted SDR which is most closely to SDR_{observation} if it is compared to USLE method. In this research, MUSLE - Sediment-Discharge Rating Curve method has evaluation values MSE = 0,08; RMSE = 0,29; and Nash = 0,75. Furthermore, Sediment Delivery Ratio at catchment area of Pacal reservoir can be formulated as $SDR_{DAS\text{ Waduk Pacal}} = 3,83 \cdot A^{-0,29}$ with value of $SDR_{Zulis} = 0,27$ and sediment yield obtained from MUSLE method equal to 157,40 ton/ha/yr, while from USLE method equal to 43,09 ton/ha/yr. Evaluate sediment yield of MUSLE from SDR_{Zulis} to formulation of SDR of former researcher was value of Nash = 0,89; MAE = 0,01. Based on the research result, it is expected that the institution which has responsibility in managing the catchment area of Pacal reservoir would pay high attention to zonation map of erosion risk level and can overcome sedimentation in Pacal reservoir.

KEYWORDS: arcview SWAT-X; catchment area of Pacal reservoir; erosion rate; sediment delivery ratio.

PENDAHULUAN

Salah satu variabel penyebab terjadinya banjir adalah kondisi Daerah Aliran Sungai (DAS) yang kritis, seperti terjadinya perubahan atau penyimpangan tata guna lahan. Dari pengamatan di lapangan diketahui bahwa di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal terjadi perubahan penggunaan lahan mayoritas akibat penebangan hutan dan pembukaan lahan baru untuk perladangan, persawahan dan pemukiman. Secara hidrologis, dampak yang terjadi adalah meningkatnya aliran limpasan permukaan, menurunnya laju infiltrasi, tererosinya lahan dan terjadinya banjir, sehingga memerlukan upaya penanganan dan pengelolaan lebih lanjut untuk mencegah kerusakan yang terjadi di daerah aliran sungai tersebut.

Berdasarkan pengamatan dari UPT. Pengelolaan Sumber Daya Air Wilayah Sungai Bengawan Solo Bojonegoro, kapasitas tampungan Waduk Pacal telah berkurang dari 41.550.000 m³ menjadi 21.500.000 m³. Berkurangnya tampungan Waduk Pacal ini diakibatkan adanya pendangkalan di dasar waduk karena sedimen yang terus bertambah setiap tahunnya akibat kerusakan lahan dan pengikisan tanah di daerah hulu.

KEPENTINGAN RISET

Berdasarkan hal tersebut, maka perlu dilakukan studi *Sediment Delivery Ratio* (SDR) dari fenomena tingginya

^aStudent in the Department of Civil Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), ITS Campus, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

^bLecturer in the Department of Civil Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), ITS Campus, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

Note. The manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 06, 2010; approved on August 23, 2010. Discussion open until May 2011. This paper is part of the ITS Journal of Civil Engineering, Vol. 30, No. 2, November 2010. © ITS Journal of Civil Engineering, ISSN 2086-1206/2010.

curah hujan yang menyebabkan terjadinya banjir dan pendangkalan Waduk Pacal akibat laju erosi yang tinggi dengan alat bantu program ArcView SWAT-X. Selain itu, menentukan formulasi dan persentase *Sediment Delivery Ratio* (SDR) Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal untuk mengetahui hasil sedimen di Waduk Pacal. Manfaat penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai salah satu masukan bagi pengelola Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal Kabupaten Bojonegoro, terutama untuk pengelolaan Waduk Pacal dalam penanggulangan pendangkalan yang terjadi dengan didukung peta zonasi laju erosi melalui Sistem Informasi Geografis (SIG).

METODOLOGI

Lokasi Penelitian

Waduk Pacal terletak di Dukuh Tretes, Desa Kedungsumber, Kecamatan Temayang, Kabupaten Bojonegoro. Secara geografis Waduk Pacal terletak di 07° 23' 25" LS dan 111° 55' 00" BT. Batas-batas Waduk Pacal antara lain sebelah Utara dibatasi oleh Desa Kedungsumber, Kecamatan Temayang, dan Desa Sumberrejo, Kecamatan Bubulan; sebelah Timur dibatasi Desa Gondang dan Desa Kalimati, Kecamatan Temayang; di sebelah Barat dibatasi Gunung Kitiran dan Gunung Dimoro; dan sebelah Selatan dibatasi oleh Desa Gondang dan Desa Senganten, Kecamatan Bubulan. Luas Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal secara administratif ± 82 Km². Kondisi topografi dan batas Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengumpulan Data

Data sekunder diperoleh dari pengumpulan data-data yang berasal dari BBWS Bengawan Solo, UPT PSDA WS Bengawan Solo Kabupaten Bojonegoro, dan Badan Pusat Statistik (BPS) Kabupaten Bojonegoro. Pengumpulan data-data harian sebagai input program seperti data curah hujan, debit, klimatologi, dan data volume sedimen dari tahun 2003-2009. Selain itu,

dibutuhkan peta-peta digital (topografi skala 1 : 25.000, kelerengan, tata guna lahan, jenis tanah, kedalaman tanah), serta data monografi lokasi studi tahun 2009/2010.

Pendekatan Masalah

Pendekatan yang digunakan dalam menganalisa besarnya laju erosi di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal Kabupaten Bojonegoro adalah melalui pengolahan peta topografi, peta tata guna lahan, peta jenis tanah dan data sekunder lainnya seperti data solum tanah, data curah hujan, data debit, data klimatologi, dan data volume waduk yang diolah dan dianalisa dengan prosedur pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG). Dalam memprediksi laju erosi digunakan 2 pendekatan metode sebagai pembanding dalam menentukan keakurasian hasil sedimen dari formulasi SDR Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal yaitu menggunakan metode USLE (*Universal Soil Loss Equation*) dan MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*).

Analisa data spasial (aspek keruangan) dilakukan

dengan bantuan perangkat lunak (*software*) ArcView SWAT-X, sedangkan analisa data non-spasial dengan menggunakan alat bantu Microsoft Excel dan ditampilkan dalam format ArcView.

Rancangan hasil studi (*output*) yang diharapkan dari kajian studi ini adalah nilai dan formulasi *Sediment Delivery Ratio* (SDR) di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal serta tingkat laju erosi yang ditunjukkan dalam bentuk peta zonasi laju erosi, yang nantinya digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi tingkat bahaya erosi yang terjadi di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal. Bagan alir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.

TINJAUAN PUSTAKA

Perkiraan Laju Erosi

Wischmeier dan Smith (1978) merumuskan proses besarnya erosi yang terjadi dalam bentuk Persamaan Umum Kehilangan Tanah (PUKT), atau dikenal dengan nama "*Universal Soil Loss Equation* (USLE)", yaitu:¹

Tabel 1. Rekap Nilai Erosivitas Hujan Pada Stasiun Hujan DAS Waduk Pacal

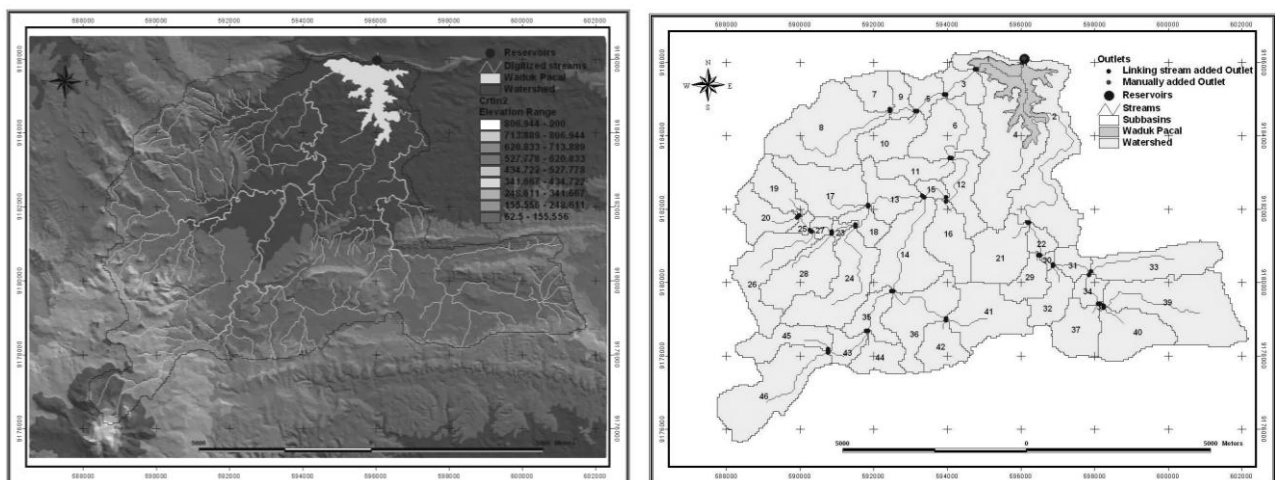
No.	Kode	Stasiun Hujan	El ₃₀ Rerata Tahunan	Luas Area (Km ²)	% Luas	Nilai R Per Area
1	55c	Gondang	338.83	22.1	27.01	91.53
2	55b	Sugihan	1,020.06	27.4	33.56	342.38
3	55a	Sukun	303.87	24.6	30.05	91.32
4	60a	Tretes	809.35	7.7	9.37	75.84
Total				82	100	
Nilai R Rata-Rata						150.27

Sumber : Hasil Perhitungan

Tabel 2. Nilai Erodibilitas Tanah Di DAS Waduk Pacal

No.	Jenis Tanah	Tekstur Tanah	Nilai K	Tingkat Erodibilitas	Luas (Km ²)	% Luas	Nilai K Per Area
1	Andosol	Ringan	0.09	Sangat Rendah	5.5	6.76	0.01
2	Litosol	Berat	0.29	Agak Tinggi	50.5	61.81	0.18
3	Regosol	Ringan	0.16	Agak Rendah	25.7	31.43	0.05
Total					82	100	
Nilai K Rata-Rata DAS							0.08

Sumber : Hasil Perhitungan dan Analisa GIS



Gambar 1. Peta Topografi Dan Batas DAS Waduk Pacal Kabupaten Bojonegoro (*Hasil Analisa Spasial*)

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad \text{atau} \quad (1)$$

$$E = R \cdot K \cdot LS \cdot VM \quad (2)$$

Bols (1978) dengan menggunakan data curah hujan bulanan di 47 stasiun penakar hujan di pulau Jawa yang dikumpulkan selama 38 tahun menentukan bahwa besarnya erosivitas hujan tahunan rata-rata² adalah sebagai berikut :

$$EI_{30, \text{bulanan}} = 6,12 (RAIN)^{1,21} \cdot (DAYS)^{-0,47} \cdot (MAXP)^{0,53} \quad (3)$$

Indeks Bahaya Erosi, IBE

Indeks bahaya erosi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan rumus¹ berikut:

$$\text{Indeks Bahaya Erosi (IBE)} = \frac{\text{Erosi Potensial (ton / ha / th)}}{\text{Edp (ton / ha / th)}} \quad (4)$$

Lengkung Debit – Sedimen (Sediment – Discharge Rating Curve)

Model yang paling umum adalah dengan mencari hubungan antara konsentrasi sedimen melayang dan debit terukur. Kemudian data debit dan konsentrasi sedimen melayang yang bersesuaian di plot pada grafik log dan *power regression* diterapkan untuk mendapatkan garis yang paling tepat melalui titik pencar. Garis yang diperoleh disebut Lengkung Debit – Sedimen (*Sediment – Discharge Rating Curve*). Menurut Balai Hidrologi dan Tata Air³, untuk mencari persamaan dari hubungan antara debit aliran dengan debit angkutan sedimen melayang

(*suspended load*) dengan lengkung sedimen suspensi (*suspended sediment rating curve*) adalah :

$$Q_{si} = k \cdot \bar{C} \cdot Q_{wi} \quad (5)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ci \quad (6)$$

$$Q_s = a Q_w^b \quad \text{atau} \quad \log Q_s = \log a + b \log Q_w \quad (7)$$

$$\log a = \frac{\sum_{i=1}^n \log Q_{si} - b \sum_{i=1}^n \log Q_{wi}}{n} \quad (8)$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n \log Q_{wi} \cdot \log Q_{si} - \sum \log Q_{wi} \cdot \sum \log Q_{si}}{n \sum_{i=1}^n \log Q_{wi}^2 - \sum \log Q_{wi}^2} \quad (9)$$

Sediment Delivery Ratio (SDR)

Nisbah jumlah sedimen yang betul-betul terbawa oleh sungai dari suatu daerah terhadap jumlah tanah tererosi dari daerah tersebut, disebut Nisbah Pelepasan Sedimen (NPS) atau *Sediment Delivery Ratio* (SDR). Menurut Asdak², untuk menentukan besarnya SDR adalah dengan menggunakan persamaan berikut :

$$SDR = \frac{SY}{E}$$

Tabel 3. Nilai Faktor LS Di DAS Waduk Pacal

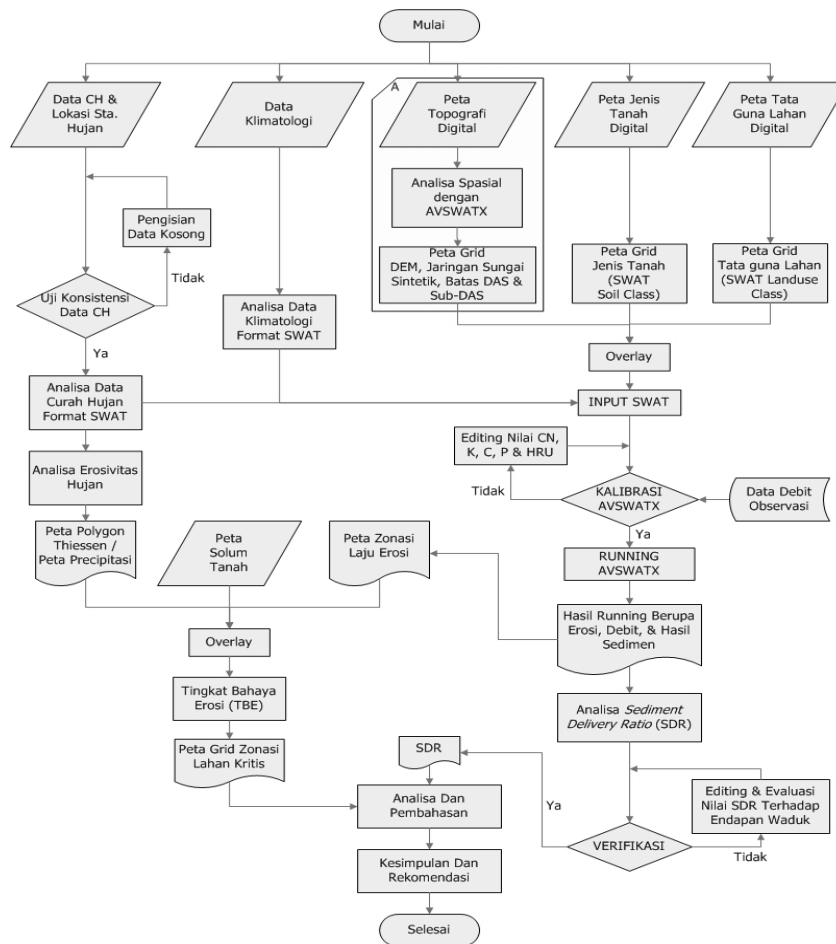
No.	Kelerengan	Kelas Lereng	Kondisi	Luas (Km ²)	Faktor LS	% Luas	Nilai LS Per Area
1	0 - 2 %	I	Datar	50.8	0.05	62.11	0.030
2	2 - 15 %	II	Landai	24.8	0.08	30.36	0.023
3	15 - 25 %	III	Agak Curam	4.9	0.17	6.03	0.010
4	25 - 40 %	IV	Curam	1.1	0.38	1.32	0.005
5	> 40 %	V	Sangat Curam	0.1	0.65	0.17	0.001
Total				82		100	
Nilai LS Rata-Rata					0.26		0.014

Sumber : Hasil Perhitungan dan Analisa GIS

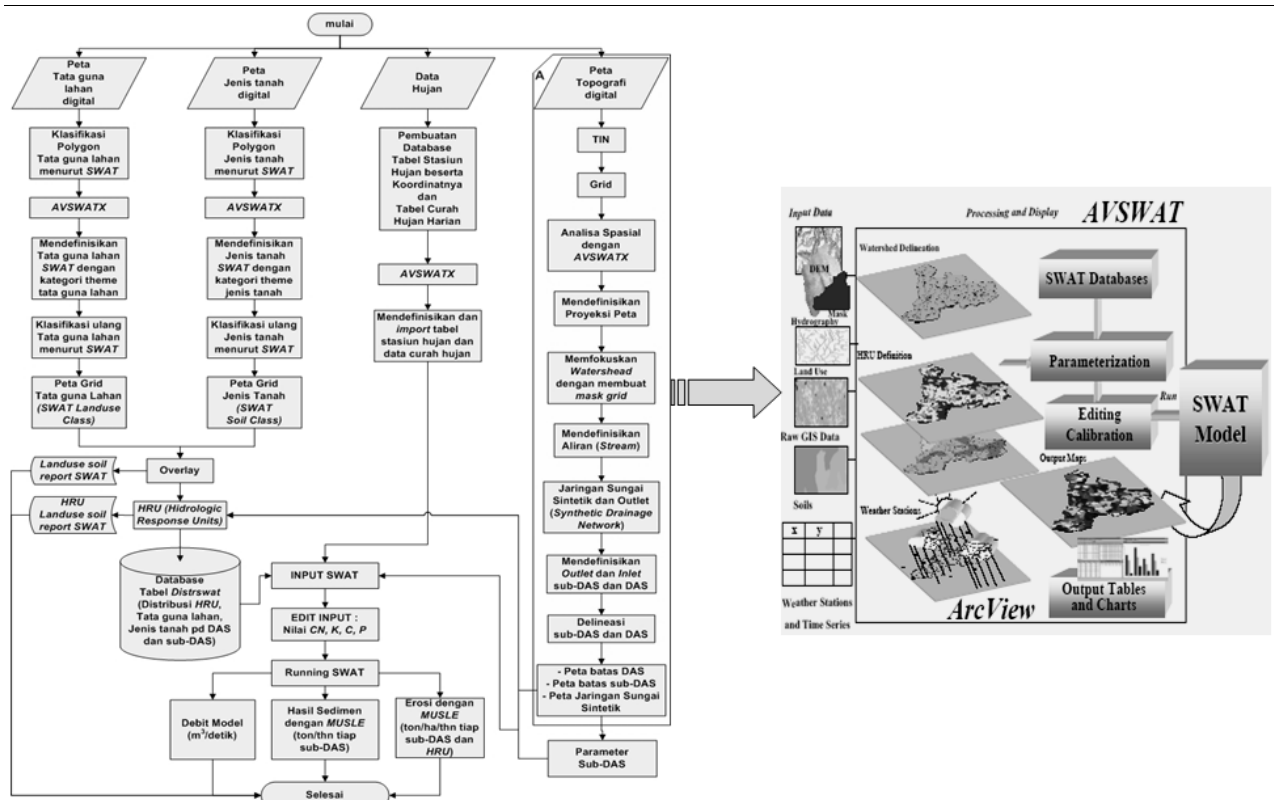
Tabel 4. Nilai Faktor C, P, Dan CP Pada Tata Guna Lahan DAS Waduk Pacal

No.	Tata Guna Lahan	Nilai C	Nilai P	Nilai CP	Luas (Km ²)	% Luas	Nilai CP Per Area
1	Danau	0.003	0.004	0.000	1.8	2.26	0.000
2	Hutan	0.200	0.300	0.060	4.9	5.98	0.359
3	Kebun	0.235	0.348	0.082	45.6	55.83	4.559
4	Ladang	0.400	0.600	0.240	3.1	3.80	0.912
5	Pemukiman	0.010	1.000	0.010	2.6	3.14	0.032
6	Sawah Irigasi	0.075	0.050	0.004	4.3	5.23	0.020
7	Sawah Tadah Hujan	0.080	0.119	0.009	10.9	13.34	0.127
8	Semak Belukar	0.300	0.450	0.135	6.8	8.29	1.120
9	Sungai	0.048	0.072	0.003	0.3	0.36	0.001
10	Tanah Kosong/Padang Rumput	0.825	0.901	0.743	1.4	1.76	1.305
Total					82	100	
Nilai CP Rata-Rata							0.843

Sumber : Hasil Perhitungan dan Analisa GIS



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian (Hasil Analisa)



Gambar 3. Proses dan Display ArcView SWAT-X⁴

Penelitian yang serupa telah dikembangkan untuk menganalisa SDR, dengan menghubungkan nilai SDR terhadap ukuran Daerah Aliran Sungai. Hubungan untuk SDR dan ukuran Daerah Aliran Sungai disebut juga sebagai lengkung SDR (*SDR curve*)². Lengkung SDR sering digunakan karena mudah penggunaannya. Beberapa persamaan lengkung SDR telah dikembangkan oleh beberapa peneliti seperti⁵:

1. Vanoni (1975): $SDR = 0,4724.A^{-0,125}$ (luas DAS dalam *square miles*) (11)
2. Boyce (1975): $SDR = 0,3750.A^{-0,2382}$ (luas DAS dalam *square miles*) (12)
3. USDA SCS (1979): $SDR = 0,5656.A^{-0,11}$ (luas DAS dalam *square miles*) (13)
4. Renfro (1975): $\log(SDR) = 1,7935 - 0,14191 \log(A)$ (luas DAS dalam Km^2) (14)

Model ArcView SWAT-X (Soil and Water Assessment Tool)

SWAT yaitu suatu model skala lembah sungai (*river basin*), atau Daerah Aliran Sungai (*watershed*) yang dikembangkan oleh Dr. Jeff Arnold dari USDA *Agricultural Research Service* (ARS) untuk memprediksi dampak dari praktek pengelolaan lahan terhadap limpasan air, sedimen dan bahan kimia agrikultur di Daerah Aliran Sungai yang besar dan kompleks dengan kondisi tanah, tata guna lahan dan pengelolaan yang bervariasi⁴. AVSWAT-X adalah sebuah *extension* dari Arcview dan *graphical user interface*. Untuk melihat proses dan display dari program AVSWAT-X dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Metode Perhitungan Besarnya Erosi Dengan AVSWAT-X

Untuk menentukan besarnya volume limpasan permukaan dengan menggunakan model SWAT (*Soil and*

Tabel 5. Hasil Pemodelan AVSWAT-X Rata-Rata Tahunan DAS Waduk Pacal

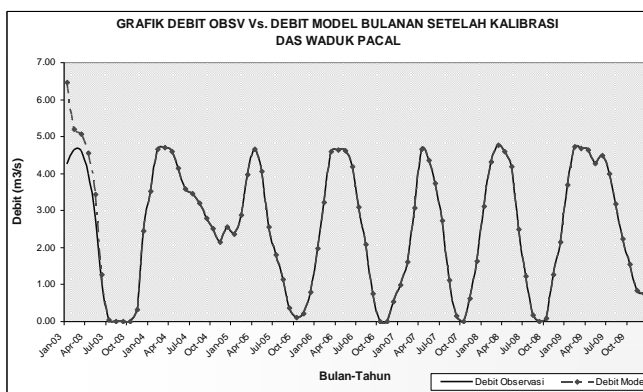
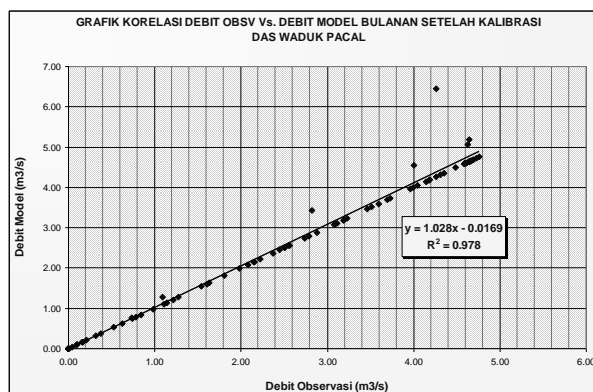
Tahun	Luas DAS (Km ²)	Flow In (m ³ /s)	Flow Out (m ³ /s)	Sediment In (ton)	Laju Erosi (ton/ha)	Limpasan (mm)
2003	82	1.95	2.38	2,977,711	438.28	11,599
2004	82	3.30	3.48	5,176,596	755.71	20,033
2005	82	2.43	2.07	2,451,129	428.24	10,542
2006	82	2.99	2.47	3,332,699	513.44	14,401
2007	82	3.60	2.06	4,948,791	633.41	20,756
2008	82	4.57	2.36	6,761,710	733.43	28,784
2009	82	4.11	3.24	5,494,335	571.51	21,859
Rata-Rata		3.28	2.58	4,448,996	582.00	18,282

Sumber : Hasil Analisa AVSWAT

Tabel 6. Tingkat Bahaya Erosi (TBE) Antara Metode USLE Dengan MUSLE

TBE USLE	Luas (Km ²)	% Luas	TBE MUSLE	Luas (Km ²)	% Luas
Rendah	47.5	58.10	Rendah	0.9	1.06
Sedang	34.3	41.90	Sedang	8.4	10.28
Tinggi	-	-	Tinggi	17.7	21.70
Sangat Tinggi	-	-	Sangat Tinggi	54.7	66.96
Total	82	100	Total	82	100

Sumber : Hasil Perhitungan dan Analisa AVSWAT



Gambar 4. Grafik Korelasi Antara Debit Observasi Dengan Debit Model Rata-Rata Bulanan Setelah Terkalibrasi (Hasil Analisa, 2011)

Water Assessment Tool), metode yang digunakan adalah metode SCS (Soil Conservation Service) Curve Number (SCS dalam *SWAT Theoretical Documentation*)⁵. Untuk memperkirakan besarnya erosi melalui SWAT menggunakan metode MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), yang dikembangkan oleh Williams (*SWAT Theoretical Documentation*)⁵.

$$sed = 11,8.(Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0,56} \quad (15)$$

$$K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot CFRG$$

Verifikasi Dan Kalibrasi Model

Kalibrasi model menggunakan data debit observasi harian tahun 2003-2009 di Waduk Pacal sedangkan verifikasi model menggunakan data endapan waduk dari perubahan kapasitas volume Waduk Pacal dari beberapa tahun yang terukur. Kriteria evaluasi model antara lain dapat dilihat dari nilai parameter-parameter berikut :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\text{Standart Deviation of Observed Data}} \quad (17)$$

$$COE = 1 - \left[\frac{RMSE^2}{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}_i \right)^2} \right] \quad (18)$$

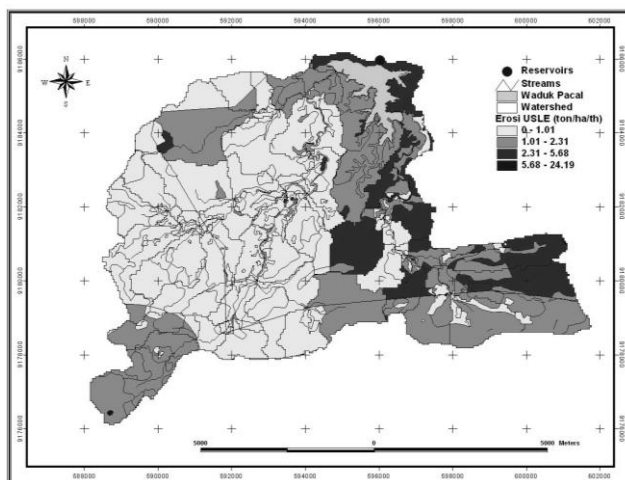
Untuk mengetahui nilai dari kalibrasi koefisien determinan menggunakan persamaan Kriteria NASH (KN) yang dirumuskan sebagai berikut :

$$KN = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_{mi})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_p)^2} \right] \times 100\% \quad (19)$$

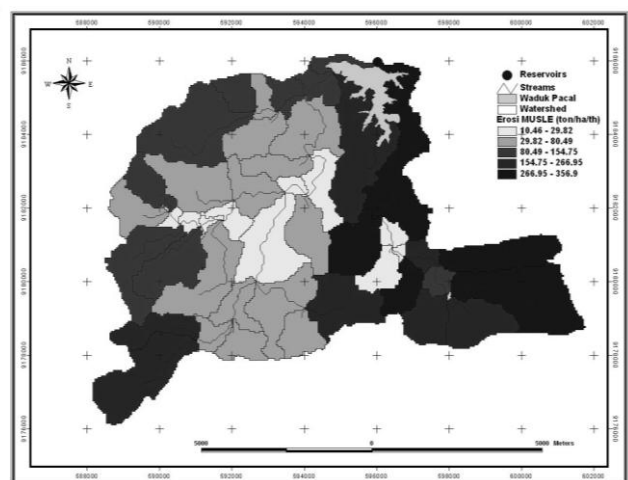
HASIL PERBANDINGAN ANTARA MODEL DAN OBSERVASI

Kalibrasi Debit

Parameter yang digunakan sebagai acuan dalam proses kalibrasi ini adalah nilai debit observasi pada *outlet*

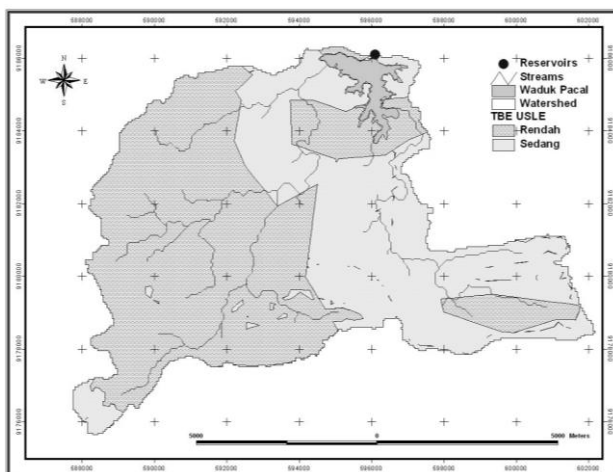


(a) Metode USLE

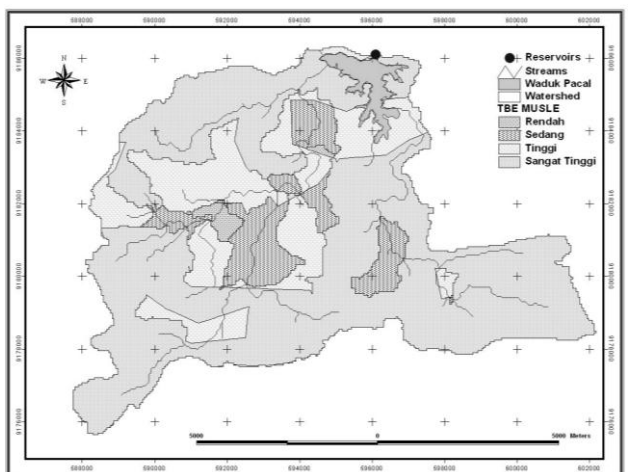


(b) Metode MUSLE

Gambar 5. Peta Laju Erosi Eksisting DAS Waduk Pacal Dengan Metode USLE dan MUSLE
(Hasil Analisa Spasial)



(a) Metode USLE



(b) Metode MUSLE

Gambar 6. Peta Tingkat Bahaya Erosi (TBE) DAS Waduk Pacal Dengan Metode USLE dan MUSLE
(Hasil Analisa Spasial)

Waduk Pacal. Nilai debit observasi ini didapatkan dari pencatatan AWLR (*Automatic Water Level Recorder*) dari tahun 2003-2009. Dalam proses kalibrasi AVSWAT-X ini menggunakan teknik kalibrasi otomatis (*automatic calibration*). Jadi pada saat menginputkan data debit observasi kedalam menu *edit input reservoir AVSWAT-X*, maka secara otomatis permodelan akan mengikuti nilai dari debit observasi. Sehingga nilai-nilai dalam permodelan AVSWAT-X akan berubah mengikuti pola sesuai dengan kalibrasi debit yang dilakukan AVSWAT-X. Sebaran data debit setelah terkalibrasi antara debit observasi dengan debit model AVSWAT-X rata-rata bulanan terkolerasi dengan baik, hal ini ditunjukkan dengan nilai korelasi R^2 sebesar 0,98 seperti terlihat pada Gambar 4, dengan nilai RMSE sebesar 0,14, dan nilai kriteria Nash sebesar 0,94 (94%).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Prediksi Erosi

Dalam studi ini menggunakan 2 pendekatan persamaan empirik sebagai pembanding dalam menganalisa hasil sedimen dari formulasi *Sediment Delivery Ratio*, yaitu :

1. Pendekatan metode USLE (*Universal Soil Loss Equation*) dengan teknik *overlay* dari peta digital tata guna lahan, peta jenis tanah, peta kelerengan, dan peta polygon Thiessen. Parameter-parameter yang digunakan dalam perkiraan laju erosi dengan metode USLE antara lain :
 - a. Indeks Erosivitas Hujan (R), hasil analisa dapat dilihat pada Tabel 1.
 - b. Faktor Erodibilitas Tanah (K), hasil analisa dapat dilihat pada Tabel 2.
 - c. Faktor Topografi (LS), hasil analisa dapat dilihat pada Tabel 3.
 - d. Faktor Vegetasi Penutup Lahan Dan Tindakan Konservasi (CP), hasil analisa dapat dilihat pada Tabel 4.

Hasil prediksi laju erosi eksisting di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal dengan menggunakan metode USLE didapatkan total laju erosi rata-rata tahunan di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal adalah sebesar 1.314.266 ton/th atau sama dengan 159,31 ton/ha/th. Untuk melihat zonasi tingkat laju erosi yang terjadi di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal dari prediksi metode USLE dapat dilihat pada Gambar 5 (a).

2. Pendekatan metode MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) dari permodelan program AVSWAT-X, didapatkan total laju erosi rata-rata tahunan di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal adalah sebesar 4.801.345 ton/th atau sama dengan 582 ton/ha/th. Hasil *output* pemodelan AVSWAT-X ditampilkan dalam Tabel 5. Sedangkan untuk melihat peta zonasi laju erosi di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal metode MUSLE ini dapat dilihat pada Gambar 5 (b).

Interpretasi dari peta zonasi laju erosi Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal baik itu menggunakan metode USLE maupun MUSLE adalah serupa dimana daerah yang memiliki tingkat laju erosi yang tinggi terletak di daerah aliran sungai Sugihan, Desa Sugihan Kecamatan Gondang, kemudian diikuti oleh Desa Sugihwaras Kecamatan Temayang, dan di hulunya aliran sungai Pacal di Desa Gondang Kecamatan Gondang. Zonasi laju erosi ini dapat digunakan untuk memprediksi potensi lahan kritis dan potensi bahaya banjir yang diakibatkan tingginya limpasan permukaan. Sehingga zonasi laju erosi ini dapat dimanfaatkan sebagai peringatan dini adanya bahaya lahan kritis dan bahaya banjir khususnya daerah yang terplot di zona tingkat laju erosi yang tinggi.

Dampak yang timbul akibat erosi adalah pendangkalan pada kali Pacal di hulu Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal, yang nantinya dapat menyebabkan banjir. Selain itu banyak ditemukannya erosi alur, erosi parit dan longsor di beberapa lahan dan tebing-tebing sungai. Begitu pula lahan di pegunungan sekitar Waduk Pacal sudah mengalami degradasi dan mengalami

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Sedimen Antara SDR_{DAS Waduk Pacal} Dengan SDR Peneliti Terdahulu

				Tahun							Rata-Rata	Standar Deviasi	
Uraian Analisa	Metode			Sat.	2003	2004	2005	2006	2007	2008			2009
Erosi	a.	USLE	E1	ton	1,087,841	1,643,294	833,339	1,077,483	1,430,918	1,805,583	1,321,404	1,314,266	342,037
	b.	MUSLE	E2	ton	3,615,663	6,234,408	3,532,854	4,235,696	5,225,417	6,050,587	4,714,788	4,801,345	1,090,602
Angkutan Sedimen	a.	<i>Sediment-Discharge Rating Curve</i> (SDRC)	S1	ton	42,228	73,506	45,287	52,154	44,793	50,309	68,073	53,764	12,210
	b.	MUSLE	S2	ton	2,977,711	5,176,596	2,451,129	3,332,699	4,948,791	6,761,710	5,494,335	4,448,996	1,561,135
Observasi	Endapan Waduk		So	ton	1,498,359	1,448,413	1,400,133	1,353,462	1,308,346	1,096,100	1,064,435	1,309,893	168,675
Δ Sed (So-So,ave)					188,466	138,521	90,240	43,569	1,546	213,792	245,457		
Hasil Sedimen													
SDR Zulis (SDR Das Waduk Pacal)	a.	USLE	SY0 = E1 x 0.270	ton	294,206	444,427	225,376	291,405	386,990	488,319	357,373	355,442	92,504
	b.	MUSLE	SY1 = E2 x 0.270	ton	977,853	1,686,091	955,458	1,145,541	1,413,210	1,636,376	1,275,111	1,298,520	294,952
SDR Vanoni	a.	USLE	SY2 = E1 x 0.307	ton	333,424	503,671	255,419	330,250	438,577	553,413	405,012	402,824	104,835
	b.	MUSLE	SY3 = E2 x 0.307	ton	1,108,204	1,910,851	1,082,823	1,298,245	1,601,595	1,854,510	1,445,086	1,471,616	334,270
SDR Boyce	a.	USLE	SY4 = E1 x 0.164	ton	178,886	270,225	137,035	177,183	235,302	296,912	217,293	216,119	56,245
	b.	MUSLE	SY5 = E2 x 0.164	ton	594,564	1,025,193	580,947	696,523	859,274	994,966	775,305	789,539	179,340
SDR USDA SCS	a.	USLE	SY6 = E1 x 0.387	ton	420,477	635,173	322,106	416,473	553,084	697,901	510,755	507,996	132,206
	b.	MUSLE	SY7 = E2 x 0.387	ton	1,397,541	2,409,749	1,365,533	1,637,199	2,019,750	2,338,698	1,822,379	1,855,836	421,544
SDR Renfro	a.	USLE	SY8 = E1 x 0.182	ton	198,295	299,544	151,903	196,407	260,832	329,127	240,869	239,568	62,347
	b.	MUSLE	SY9 = E2 x 0.182	ton	659,074	1,136,426	643,979	772,095	952,504	1,102,918	859,425	875,203	198,798

kerusakan lahan baik itu secara kualitas dan kuantitas, sehingga menyebabkan pendangkalan di Waduk Pacal. Semakin tinggi tingkat laju erosinya, maka semakin berpotensi kritis lahannya. Jika lahannya semakin kritis, maka dapat meningkatkan banjir akibat tingginya limpasan permukaan. Sehingga perlu adanya tindakan dalam pengelolaan Daerah Aliran Sungai baik itu dalam pengelolaan vegetasi tanaman dan tindakan konservasi lahan.

Tingkat Bahaya Erosi

Analisa Indeks Bahaya Erosi (IBE) dilakukan untuk mengetahui kelas Tingkat Bahaya Erosi (TBE) suatu lahan dengan mempertimbangkan laju erosi yang terjadi. Dari Tingkat Bahaya Erosi (TBE) yang terjadi maka akan diketahui luasan lahan yang berpotensi kritis seperti pada Tabel 6.

Pada dasarnya pola zonasi Tingkat Bahaya Erosi (TBE) yang dibentuk baik itu menggunakan metode USLE ataupun MUSLE adalah serupa, itu semua dikembalikan kepada kehendak pengguna (*user optional*)

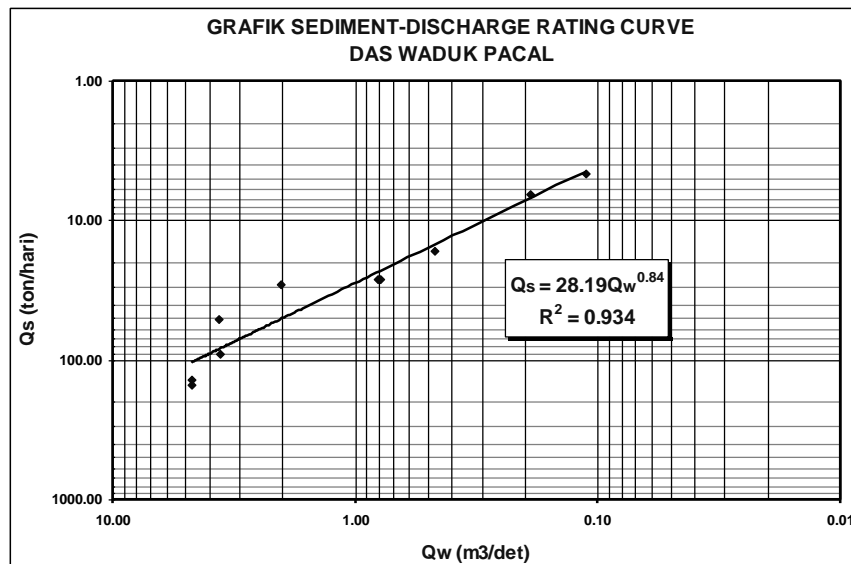
dalam perencanaan bangunan erosi atau tindakan konservasi lahan dan hutan nantinya. Zona potensi lahan kritis yang tercover dari kedua metode tersebut terletak pada daerah yang serupa dengan laju erosi yang tinggi, tepatnya di daerah pegunungan atau dataran tinggi wilayah Sugihan, Gondang, Kec. Bubulan dan Kec. Temayang. Untuk melihat perbedaan zonasi Tingkat Bahaya Erosi dari kedua metode dapat dilihat pada Gambar 6 (a) dan (b).

Pembahasan Analisa Sedimentasi

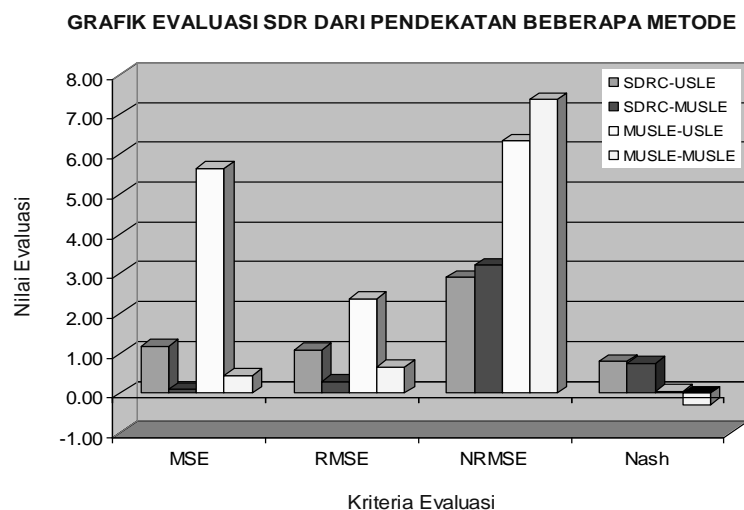
Berdasarkan analisa lengkung debit sedimen di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal menunjukkan hubungan langsung positif dengan nilai korelasi $R^2 = 0,93$ dan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$Q_s = 28,19.Q_w^{0,84}$$

Hasil analisa lengkung debit sedimen di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal menunjukkan nilai konstanta $b = 0,84$ dan nilai $a = 28,19$ dimana dalam Balai Hidrologi dan Tata Air ³, jika nilai $a > 26$ berarti mengindikasikan bahwa tingkat laju erosinya tinggi. Berdasarkan indikasi



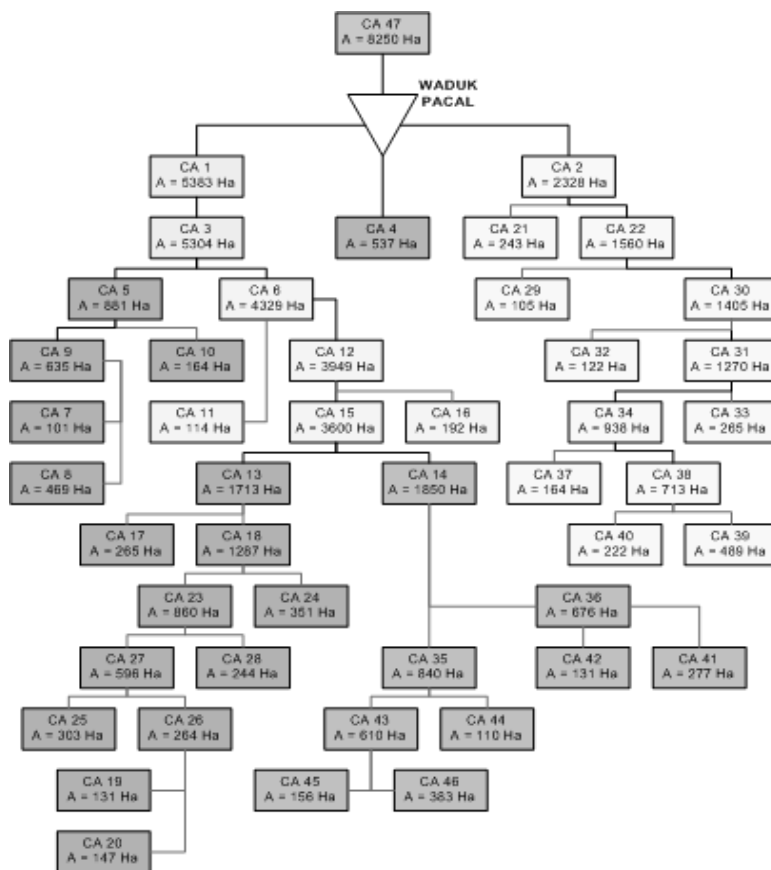
Gambar 7. Grafik Lengkung Debit – Sedimen (*Sediment – Discharge Rating Curve*) DAS Waduk Pacal (*Hasil Analisa*)



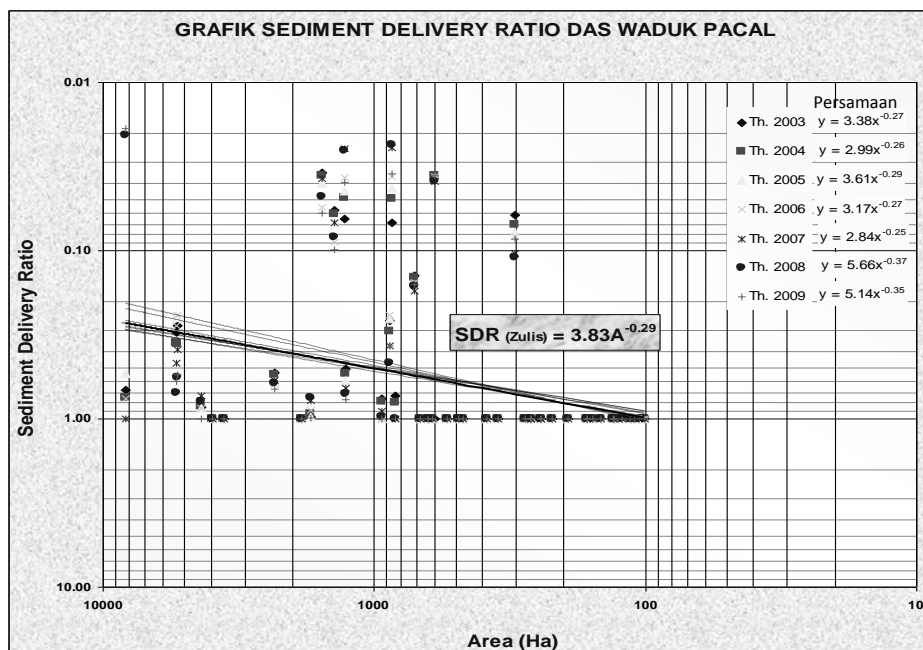
Gambar 8. Grafik Evaluasi SDR Dari Pendekatan Beberapa Metode Terhadap SDR Observasi (*Hasil Analisa*)

tersebut menunjukkan bahwa di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal tingkat laju erosi sudah mengalami peningkatan, maka perlu adanya suatu pengelolaan daerah aliran sungai secara terpadu agar dapat mengurangi dampak dari bahaya erosi yang terjadi. Hasil grafik lengkung debit sedimen di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal dapat dilihat pada Gambar 7.

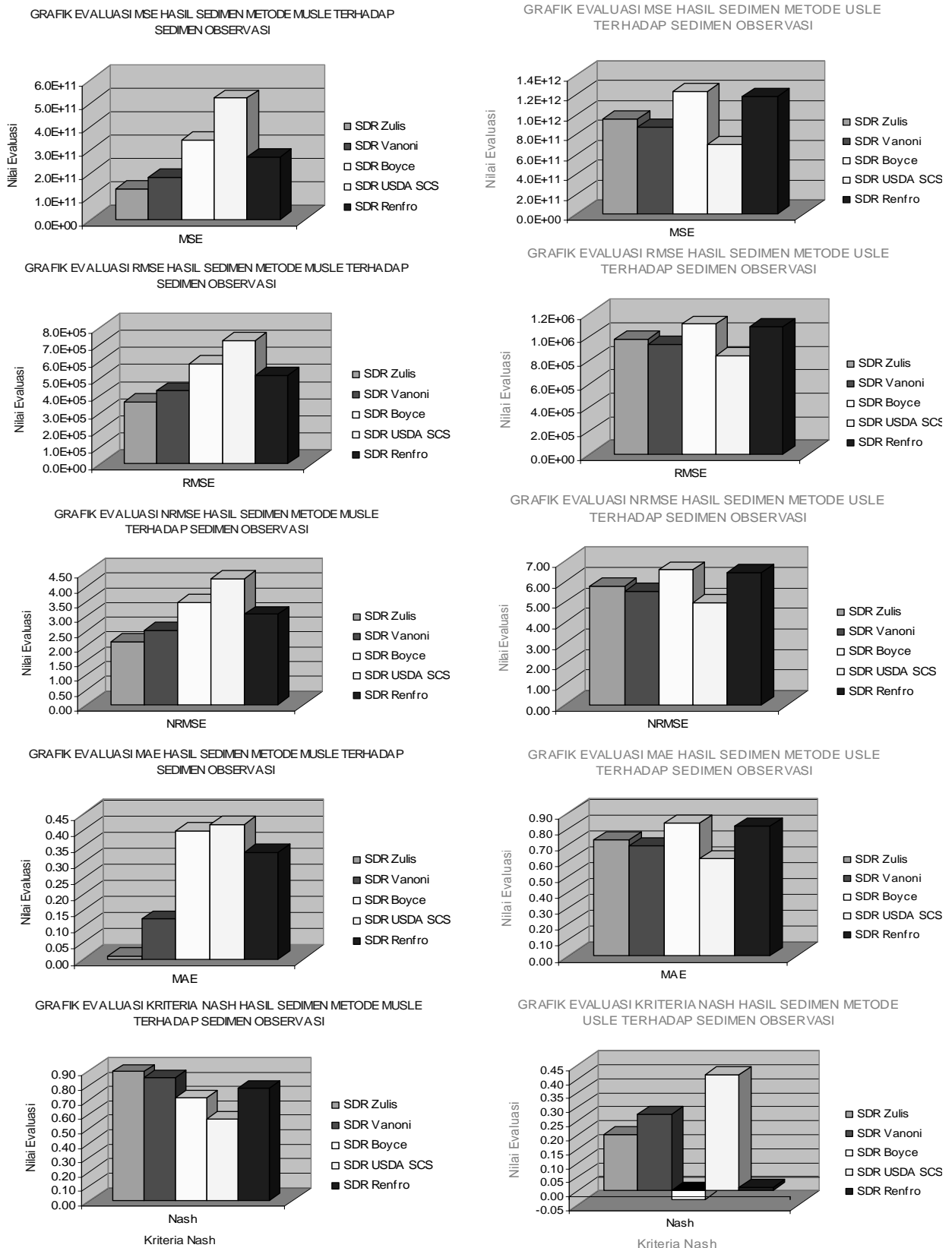
Debit *total load* Waduk Pacal adalah rata-rata sebesar 53.764 ton/th dengan debit *suspended load* rata-rata sebesar 21.506 ton/th dan debit *bed load* rata-rata sebesar 32.259 ton/th. Perbandingan antara debit *total load* Waduk Pacal dengan debit sedimen model AVSWAT-X memiliki hubungan yang baik dengan ditunjukkan oleh nilai evaluasi kriteria Nash sebesar 96,56%.



Gambar 9. Skema Pembagian Sub DAS Berdasarkan Jaringan Sungai Dan Kumulatif Area DAS Waduk Pacal (Hasil Analisa)



Gambar 10. Grafik Formulasi *Sediment Delivery Ratio* DAS Waduk Pacal (Hasil Analisa)



Gambar 11. Grafik Perbandingan Evaluasi Hasil Sedimen Antara Metode MUSLE dan USLE Terhadap Sedimen Observasi Dari Beberapa Perumusan SDR (*Hasil Analisa*)

Pembahasan Sediment Delivery Ratio (SDR)

Perkiraan nilai SDR antara pendekatan metode USLE dan MUSLE yang paling mendekati dengan nilai SDR observasi adalah nilai SDR metode MUSLE dengan pendekatan analisa sedimentasi metode lengkung debit-sedimen (*Sediment-Discharge Rating Curve*, SDRC)

dengan nilai evaluasi MSE sebesar 0,08; RMSE sebesar 0,29; dan nilai kriteria Nash sebesar 0,75. Hasil evaluasi prakiraan nilai SDR dari pendekatan beberapa metode dapat dilihat pada Gambar 8.

Setelah diketahui metode yang paling sesuai dengan pemodelan laju erosi di Daerah Aliran Sungai Waduk

Pacal adalah metode MUSLE, maka langkah selanjutnya adalah menentukan bentuk formulasi SDR Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal. Untuk menentukan formulasi SDR di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal dengan menggunakan metode MUSLE dari hasil pemodelan, maka perlu mengkumulatifkan luasan dari masing-masing sub Daerah Aliran Sungai sesuai dengan jaringan sungai dari hulu ke hilir seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Dengan begitu akan diketahui sebaran nilai SDR dari masing-masing luasan sub Daerah Aliran Sungai sampai luasan total Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal. Dengan mengplotkan nilai SDR pada masing-masing tahun dengan kumulatif luasan di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal seperti terlihat pada Gambar 10, maka diperoleh bentuk *trend* formulasi SDR_{DAS Waduk Pacal} sebagai berikut :

$$SDR_{DAS\ Waduk\ Pacal} = 3,83.A^{-0,29} \text{ (luas DAS dalam Ha)}$$

Dengan total luas Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal sebesar 8250 Ha atau sama dengan 82 Km² (31,65 *square miles*), maka berdasarkan formulasi SDR_{DAS Waduk Pacal} didapatkan nilai SDR di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal sebesar 0,270 (27%).

Verifikasi Hasil Sedimen

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk memperkirakan besarnya hasil sedimen dari suatu tangkapan air adalah melalui analisa *Sediment Delivery Ratio*. Dalam verifikasi hasil sedimen di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal yaitu dengan cara membandingkan hasil sedimen dari analisa SDR dengan hasil sedimen lapangan yang berupa sedimen yang terendapkan di dasar Waduk Pacal.

Hasil rekapitulasi analisa hasil sedimen di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal baik itu hasil dari formulasi SDR_{DAS Waduk Pacal} maupun dari hasil formulasi SDR peneliti terdahulu dapat dilihat pada Tabel 7. Sedangkan untuk melihat perbandingan hasil evaluasi hasil sedimen dari formulasi SDR_{DAS Waduk Pacal} maupun dari hasil formulasi SDR peneliti terdahulu antara metode MUSLE dan USLE dapat dilihat pada Gambar 11.

Berdasarkan Tabel 7 Hasil sedimen rata-rata dari formulasi SDR_{Zulis} terhadap laju erosi metode MUSLE adalah sebesar 1.298.520 ton/th atau sama dengan 157,40 ton/ha/th. Sedangkan hasil sedimen rata-rata dari formulasi SDR_{Zulis} terhadap laju erosi metode USLE didapat 355.442 ton/th atau sama dengan 43,09 ton/ha/th. Jika dibandingkan dengan hasil sedimen observasi rata-rata yaitu sebesar 1.309.893 ton/th atau sama dengan 158,78 ton/ha/th, maka hasil sedimen rata-rata yang paling mendekati adalah hasil sedimen dengan metode MUSLE, sedangkan pada metode USLE dalam memperkirakan tingkat laju erosinya kurang sehingga didapatkan hasil sedimen yang lebih kecil daripada hasil sedimen observasinya.

Evaluasi hasil sedimen metode MUSLE terhadap hasil sedimen observasi menunjukkan bahwa verifikasi hasil sedimen dari formulasi SDR_{DAS Waduk Pacal} sendiri memiliki nilai kriteria Nash lebih besar dibandingkan dengan beberapa formulasi SDR peneliti terdahulu yaitu sebesar 0,89 dan memiliki tingkat kesalahan lebih kecil dibandingkan formulasi SDR lainnya yang ditunjukkan dengan nilai MAE sebesar 0,01. Sedangkan pada metode USLE menunjukkan nilai evaluasi kriteria Nash sebesar

0,20 dan MAE sebesar 0,73, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11, maka dapat diambil kesimpulan bahwa metode pendugaan laju erosi yang lebih cocok dan akurat di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal adalah menggunakan metode MUSLE.

KESIMPULAN DAN SARAN

Zonasi laju erosi dapat digunakan untuk memprediksi potensi lahan kritis dan potensi bahaya banjir yang diakibatkan tingginya limpasan permukaan. Sehingga zonasi laju erosi ini dapat dimanfaatkan sebagai peringatan dini adanya bahaya lahan kritis dan bahaya banjir khususnya daerah yang terplot di zona tingkat laju erosi yang tinggi. Dengan formulasi $SDR_{DAS\ Waduk\ Pacal} = 3,83.A^{-0,29}$ didapatkan nilai SDR di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal sebesar 0,270 (27%). Mengingat nilai SDR sangat penting dalam kaitannya dengan prediksi *sediment yield* dari pendekatan perhitungan erosi lahan, maka untuk memperoleh nilai SDR yang lebih mendekati kenyataan di lapangan sebaiknya analisa *total load* menggunakan data terukur dari sedimentasi waduk melalui pengukuran *echo sounding*.

Verifikasi hasil sedimen metode MUSLE dari formulasi SDR_{DAS Waduk Pacal} terhadap hasil sedimen observasi menunjukkan nilai kriteria Nash sebesar 0,89 dan MAE sebesar 0,01. Sedangkan pada metode USLE menunjukkan nilai evaluasi kriteria Nash sebesar 0,20 dan MAE sebesar 0,73. Jadi dapat diambil kesimpulan bahwa metode pendugaan laju erosi yang lebih cocok dan akurat di Daerah Aliran Sungai Waduk Pacal adalah menggunakan metode MUSLE.

Untuk menekan laju erosi, sebaiknya daerah yang kritis pada zona proteksi dilakukan *forestrisasi* atau reboisasi dengan beberapa kombinasi tanaman dan menanam tanaman yang bersifat *covering* dengan kerapatan yang tinggi, atau dengan perletakan bangunan-bangunan pengendali erosi seperti *Step Dam*, *Check Dam*, *Ground Sill*, Pengendali Jurang (*Gully Plugs*), Bangunan Terjunan (*Drop Structures*), dan Teras Bangku.

NOTASI

E	= Banyaknya tanah tererosi (ton/ha/th)
R	= Indeks erosivitas hujan dan aliran permukaan, tahunan (KJ/ha)
K	= Faktor erodibilitas tanah (ton/KJ)
LS	= Faktor Topografi terdiri dari Faktor Panjang Lereng (L) dan Faktor Kemiringan Lereng (S)
C	= Faktor vegetasi penutup tanah dan pengelolaan tanaman
P	= Faktor tindakan khusus konservasi tanah
VM	= Faktor konservasi tanah dan sistem pertanian
EI ₃₀	= Erosivitas hujan rata-rata tahunan
RAIN	= Curah hujan bulanan per tahun (cm)
DAYS	= Jumlah hari hujan dalam satu bulan per tahun (hari)

MAXP	=	Curah hujan maksimum dalam 24 jam per bulan untuk kurun waktu satu tahun (cm)	KN	=	Koefisien Deterministik Nash
Erosi potensial	=	$R \cdot K \cdot LS$ (ton/ha/th)	Q_{pi}	=	Debit Observasi ke i (m^3/dt)
Edp	=	Erosi yang masih diperbolehkan (ton/ha/th)	Q_{mi}	=	Debit Model ke i (m^3/dt)
Q_{si}	=	Angkutan sedimen melayang saat pengukuran (ton/hari)	Q_p	=	Debit Observasi rata-rata (m^3/dt)
k	=	Faktor konversi satuan ($k = 0,0864$)	$SDR_{DAS \text{ Waduk Pacal}}$	=	<i>Sediment Delivery Ratio</i> DAS Waduk Pacal
\bar{C}	=	Konsentrasi sedimen rata-rata (mg/l)			
Q_{wi}	=	Debit hasil pengukuran (m^3/det)			
c_i	=	Konsentrasi sedimen pada saat ke i (mg/l)			
n	=	Jumlah titik pengambilan contoh air dalam satu kali pengukuran debit			
Q_s	=	Angkutan sedimen melayang harian (ton/hari)			
Q_w	=	Debit harian (m^3/det)			
a dan b	=	konstanta kalibrasi			
SDR	=	<i>Sediment Delivery Ratio</i>			
SY	=	<i>Sediment Yield</i> yang di peroleh di outlet DAS/sub DAS (ton/ha/th)			
A	=	Luas DAS			
sed	=	Hasil sedimen per hari (ton)			
Q_{surf}	=	Volume aliran limpasan permukaan (mm/ha)			
q_{peak}	=	Debit puncak limpasan (<i>peak runoff rate</i>) (m^3/dt)			
$area_{hru}$	=	Luas HRU (<i>Hydrologic Response Unit</i>) (ha)			
CFRG	=	Faktor pecahan batuan kasar			
RMSE	=	<i>Root Mean Squared Error</i>			
NRMSE	=	<i>Normalised Root Mean Squared Error</i>			
COE	=	<i>Coefficient of Efficiency</i>			
y_i	=	Data target			
\hat{y}_i	=	Data prediksi			

DAFTAR PUSTAKA

1. Arsyad, Sitanala, *Konservasi Tanah Dan Air*, Bogor, IPB Press, 2000.
2. Asdak, Chay, *Hidrologi Dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Yogyakarta, Gadjah Mada University Press, 2004.
3. Anonim, *Pengukuran Angkutan Sedimen Di Saluran/Sungai*, Jakarta, Balai Hidrologi dan Tata Air, Puslitbang SDA, Badan Litbang PU, -.
4. Di Luzio, M. et al., *ArcView Interface For SWAT2000 User's Guide*, Texas, USDA Agricultural Research Service, 2002.
5. Ouyang, Da. et al., *Assessing Sediment Loading From Agricultural Croplands in The Great Lakes Basin*, The Journal of American Science, 2005, <http://www.americanscience.org>.
6. Ouyang, Da. et al., *Predicting Sediment Delivery Ratio In Saginaw Bay Watershed*, Michigan State University, Institute of Water Research, 1997.
7. Neitsch, S. L. et al., *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*, Texas, USDA Agricultural Research Service, 2005.
8. Anonim, *Integrated River Basin Water Resources Planing*, Volume 8 *Erosion, Sedimentation and Flooding*, Bandung : Pusat Litbang Pengairan dan Delft Hydraulic The Netherlands, 1991.
9. Suhartanto, Ery, *Panduan AVSWAT 2000 dan Aplikasinya Di Bidang Teknik Sumberdaya Air*, Malang, CV. Asrori, 2008.